

سیده مریم عمادی

نشانی پستی: مازندران، ساری، خیابان امیر مازندرانی، خیابان شهیدان عبوری، خیابان علمیه، کوچه بلال، پلاک ۸۵

کد پستی: 48156-73815

شماره تماس: 0151-2263788

شماره همراه: 09128239437

seyedehmaryamemadi@gmail.com

کامیار موقرنژاد

نشانی پستی: مازندران، بابل، خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل، دانشکده مهندسی شیمی

کد پستی: ۴۷۱۴۸-۷۱۱۶۷

صندوق پستی: ۴۸۴

شماره تماس: 0111- 3234204

شماره همراه: ۰۹۱۱۳۱۲۰۴۱۴

movagharnejad@yahoo.com

k-movaghar@nit.ac.ir

سیده زهرا عمادی

نشانی پستی: مازندران، ساری، خیابان ملامجدالدین، خیابان آتش نشانی، کوچه شقایق، سازمان عمران شهرداری

کد پستی: ۴۸۱۷۷-۳۷۱۹۵

شماره تماس: ۰۱۵۱-۳۲۶۶۰۶۰

شماره همراه: ۰۹۱۱۲۵۲۸۷۷۱

zahra.emadi@gmail.com

بهینه سازی محاسبات ترمودینامیکی مخازن هیدروکربوری با استفاده از معادلات حالت مکعبی و الگوریتم ژنتیک

سیده مریم عمادی ، کامیار موقرنژاد ، سیده زهرا عمادی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی شیمی

seyedehmaryamemadi@gmail.com

چکیده

معادلات حالت مهمترین ابزار جهت محاسبه و تخمین خواص ترمودینامیکی در صنایع شیمیایی و استخراج و بهره برداری از مخازن هیدروکربوری می باشند. معادلات حالت مکعبی دسته مهمی از معادلات حالت می باشند که به علت دارا بودن فرم نسبتا ساده ریاضی و همچنین دقت خوب در محاسبات مورد توجه بیشتر قرار می گیرند. در این پژوهش محاسبات ترمودینامیکی در مخلوطهای دوتایی مورد بررسی قرار گرفته است. دقت این محاسبات به میزان بسیار بالایی به مقدار پارامتر برهم کنش دو تایی وابسته است. در مراجع این پارامتر به صورت مقدار ثابتی گزارش شده است و تغییرات آن نسبت به شرایط مختلف ترمودینامیکی لحاظ نگردیده است. به علت این تخمین، انحراف بسیار زیادی در نتایج حاصل از محاسبات نسبت به مقادیر تجربی حاصل می گردد. به همین دلیل جهت اصلاح مقدار این پارامتر، ابتدا معادلات مرتبط با محاسبات توابع ترمودینامیکی مختلف (حجم، آنتالپی، آنتروپی و انرژی داخلی، ضریب تراکم پذیری) را بر مبنای فرم ریاضی منحصر به فرد هر کدام از معادلات حالت استخراج نموده ایم. سپس نرم افزاری را با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک و به کار گیری الگوریتم ژنتیک طراحی کرده ایم تا مقدار اپتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی را با استفاده از داده های تجربی محاسبه نماید. این بهینه سازی دقت معادلات حالت را به میزان بسیار زیادی افزایش می دهد. همچنین با استفاده از این نرم افزار می توان مقادیر توابع ترمودینامیکی را در شرایط مختلف هم دما و هم فشار و همچنین با استفاده از مقادیر دلخواه پارامترهای برهم کنش دوتایی مختلف محاسبه نمود که این قابلیت، کاربرد فراوانی را در محاسبات ترمودینامیکی مخازن هیدروکربوری داراست.

واژه های کلیدی: بهینه سازی، خواص ترمودینامیکی، الگوریتم ژنتیک

۱. کارشناس ارشد مهندسی شیمی - دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشیار - دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. کارشناس نرم افزار - سازمان عمران شهرداری ساری

1-مقدمه

از آنجا که معادلات حالت مکعبی ابزار قدرتمندی جهت محاسبات ترمودینامیکی مخازن هیدروکربوری می باشند، بر آن شدیم تا دقت این محاسبات را به میزان مطلوب تری افزایش دهیم. فرضیه ثابت بودن پارامتر بر هم کنش دو تایی و داده های گزارش شده در مراجع [1]، انحراف زیادی نسبت به مقادیر تجربی حاصل نموده و از مطلوبیت نتایج محاسبات می کاهد. به همین دلیل در این پژوهش، روشی را جهت بهینه سازی این محاسبات با لحاظ کردن شرایط مختلف ترمودینامیکی ارائه می نماییم.

2-بحث

در این بررسی، چهار معادله حالت مکعبی (ون در والس، ردلیش کوانگ، پنگ رایبسنون، سوآو ردلیش کوانگ) را مورد مطالعه قرار داده ایم [2]. شکل کلی معادلات مکعبی حالت به صورت زیر می باشد:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{(V+\epsilon b)(V+\epsilon b)} \quad (1)$$

همچنین روابط زیر برقرار است:

$$a(T) = \psi \frac{\alpha(T_r)R^2T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = \Omega \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

پارامترهای مرتبط و ضریب ها در جدول ۱ توصیف شده اند:

جدول ۱: شکل کلی معادلات حالت مکعبی و پارامترها و ضرایب مرتبط

معادله حالت	$\alpha(T_r)$	σ	ϵ	Ω	ψ	Z_c
VDW (1873)	1	0	0	$\frac{1}{8}$	$\frac{27}{64}$	$\frac{3}{8}$
RK (1949)	$T_r^{-\frac{1}{2}}$	1	0	0.08664	0.42748	$\frac{1}{3}$
SRK (1972)	$\alpha_{SRK}(T_r, \omega)$	1	0	0.08664	0.42748	$\frac{1}{3}$
PR (1976)	$\alpha_{PR}(T_r, \omega)$	$1 + \sqrt{2}$	$1 - \sqrt{2}$	0.07780	0.45724	0.30740
$\alpha_{SRK}(T_r, \omega) = \left[1 + \left[(0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2) \left(1 - T_r^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \right]$						
$\alpha_{PR}(T_r, \omega) = \left[1 + \left[(0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2) \left(1 - T_r^{\frac{1}{2}} \right) \right]^2 \right]$						

جهت انجام بهینه سازی و تعیین مقدار اِپتیمم، ابتدا محاسبات مرتبط با معادلات ترمودینامیکی را انجام داده ایم. جهت انجام محاسبات نیازمند تعریف دو دمای معین به شکل زیر می باشیم:

$$T_{am} = \frac{T + T_0}{2} \quad (4)$$

$$T_{lm} = \frac{T - T_0}{\ln\left(\frac{T}{T_0}\right)} \quad (5)$$

و همچنین ظرفیت حرارتی هر کدام از اجزا در فشار ثابت و دمای معین :

$$C_p^{ig}(T) = R[L_1 + L_2T + L_3(T)^2 + L_4(T)^{-2}] \quad (6)$$

پارامترهای L_1, L_2, L_3, L_4 مقادیری متغیر هستند که وابسته به اجزاء سازنده مخلوط بوده و مقادیر آنها در مراجع مختلف آمده است [3]. مقادیر گزارش شده در مراجع به عنوان پیش فرض در نرم افزار گنجانده شده اند که همانند دیگر مقادیر پیش فرض در این نرم افزار، توسط کاربر قابل تغییر می باشند.

به منظور محاسبه مقادیر آنتالپی و آنترופی در شرایط متغیر ترمودینامیکی، از مقادیر توابع باقیمانده و مقادیر مبنا استفاده کرده ایم [4]. فرم کلی این معادلات عبارتند از:

$$\frac{H^R}{RT} = -T \int_0^P \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \frac{dP}{P} \quad (7)$$

$$\frac{S^R}{R} = -T \int_0^P \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_P \frac{dP}{P} - \int_0^P (Z - 1) \frac{dP}{P} \quad (8)$$

از آنجا که هر کدام از معادلات مذکور، وابسته به فرم ریاضی معادلات حالت مکعبی می باشند، معادله مرتبط با هر کدام از معادلات حالت مکعبی را بر مبنای فرم کلی توابع باقیمانده استخراج نموده ایم. به عنوان مثال، توابع مرتبط با معادله ردلیش کوانگ عبارتند از:

$$H^R = RT \left[Z - 1 + \left[\left(-\frac{3}{2} \right) \frac{T_{Cij}^{\frac{3}{2}}}{T^2} \times \frac{0.42748}{0.08664} \ln \left[1 + \frac{\left[0.08664 \frac{PT_{Cij}}{TP_{Cij}} \right]}{Z} \right] \right] \right] \quad (9)$$

$$S^R = RT \left[\ln \left(Z - 0.08664 \frac{PT_{Cij}}{TP_{Cij}} \right) - \left[\frac{1}{2} \frac{T_{Cij}^{\frac{3}{2}}}{T^2} \times \frac{0.42748}{0.08664} \ln \left[1 + \frac{\left[0.08664 \frac{PT_{Cij}}{TP_{Cij}} \right]}{Z} \right] \right] \right] \quad (10)$$

همان طور که در معادلات بالا مشهود می باشد، جهت انجام محاسبات نیازمند استخراج معادله Z برای هر کدام از معادلات حالت می باشیم. به عنوان مثال نتایج محاسبات مرتبط با معادله حالت ردلیش کوانگ عبارتند از:

$$(Z^l)^3 - (Z^l)^2 + \left(\frac{a^l P}{R^2 T^{\frac{5}{2}}} - \frac{(b^l)^2 p^2}{R^2 T^2} - \frac{b^l P}{RT} \right) Z^l - \frac{a^l b^l P^2}{R^3 T^{\frac{7}{2}}} = 0 \quad (11)$$

$$(Z^v)^3 - (Z^v)^2 + \left(\frac{a^v P}{R^2 T^{\frac{5}{2}}} - \frac{(b^v)^2 p^2}{R^2 T^2} - \frac{b^v P}{RT} \right) Z^v - \frac{a^v b^v P^2}{R^3 T^{\frac{7}{2}}} = 0 \quad (12)$$

در نتیجه:

$$H^l = H_0^l + H_0^g + \left[\left(\sum x_i (C_P^{ig}(T_{lm}))_i \right) (T - T_0) \right] + (H^R)^l \quad (13)$$

$$H^v = H_0^l + H_0^g + \left[\left(\sum y_i (C_P^{ig}(T_{lm}))_i \right) (T - T_0) \right] + (H^R)^v \quad (14)$$

$$S^l = S_0^l + S_0^g + \left[\sum x_i (C_P^{ig}(T_{lm}))_i \left(\ln \frac{T}{T_0} \right) \right] - R \ln \frac{P}{P_0} - R \sum x_i \ln x_i + (S^R)^l \quad (15)$$

$$S^v = S_0^l + S_0^g + \left[\sum y_i (C_P^{ig}(T_{lm}))_i \left(\ln \frac{T}{T_0} \right) \right] - R \ln \frac{P}{P_0} - R \sum y_i \ln y_i + (S^R)^v \quad (16)$$

و همچنین:

$$U = H - PV \quad (17)$$

همچنین جهت انجام محاسبات حجمی معادلات ذیل لحاظ گردیده اند:

$$V^l = \frac{Z^l RT}{P} \quad (18)$$

$$V^v = \frac{Z^v RT}{P} \quad (19)$$

قاعده اختلاط در مخلوطهای دوتایی که در این پژوهش اعمال گردیده قاعده اختلاط کلاسیک می باشد [5] که وابستگی پارامتر برهم کنش دوتایی را به شکل زیر بیان می کند:

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{\frac{1}{2}} (1 - k_{ij}) \quad (20)$$

3- معرفی نرم افزار

برای انجام این محاسبات، نرم افزاری را با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک طراحی نموده ایم. جهت تعیین مقدار ایتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی، الگوریتم ژنتیک را اعمال نموده ایم. بهینه سازی محاسبات با استفاده از داده های تجربی در دسترس کاربر و اعمال الگوریتم ژنتیک به منظور حداقل کردن انحراف محاسبات انجام می گردد. در ادامه، چگونگی کار با نرم افزار حاصل، تشریح می گردد.

کاربر می بایست در ابتدا شرایط ترمودینامیکی سیستم را به لحاظ هم دما بودن و یا هم فشار بودن تعریف نماید. سپس اجزای سازنده مخلوط دوتایی را وارد نماید. نرم افزار به گونه ای طراحی شده است که با انتخاب اجزای مخلوط، پارامترهای ترمودینامیکی مرتبط با آن از جمله فشار بحرانی، دمای بحرانی، ضریب تراکم پذیری بحرانی، ضریب بی مرکزی و .. را نمایش می دهد. این مقادیر به صورت پیش فرض در بانک اطلاعاتی نرم افزار قرار داده شده اند [6] که توسط کاربر نیز قابل تغییر می باشند.

همچنین مقادیر پیش فرض مبنا به صورت ذیل لحاظ گردیده اند [7]:

$$T_0 = 298.15K \quad P_0 = 0.101325MPa$$

$$H_0 = 0 \text{ Jmol}^{-1} \quad S_0 = 0 \text{ Jmol}^{-1}K^{-1}$$

سپس انتخاب تابع ترمودینامیکی مورد نظر جهت بهینه سازی و همچنین ورود داده های تجربی مرتبط، توسط کاربر انجام می گردد. داده های تجربی می توانند به یکی از هشت شکل زیر وارد گردند:

جدول ۲: اشکال مختلف داده های تجربی ورودی نرم افزار

T, P, V^1, x	T, P, H^1, x	T, P, S^1, x	T, P, U^1, x
T, P, V^v, y	T, P, H^v, y	T, P, S^v, y	T, P, U^v, y

تعداد داده های تجربی ورودی بستگی به داده های در دسترس کاربر دارد و می تواند تغییر کند. بعد از وارد کردن این داده ها، معادله حالت مورد نظر کاربر از میان چهار معادله حالت مکعبی گنجانده شده در نرم افزار انتخاب می گردد. سپس با فشار دادن آیکن "محاسبه اپتیمم" مقدار اپتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی و همچنین مقادیر توابع ترمودینامیکی مذکور با استفاده از این مقدار اپتیمم، محاسبه شده و نمایش داده می شوند. از دیگر قابلیت های بسیار مهم این نرم افزار این است که کاربر می تواند مقادیر متغیر و دلخواهی از پارامتر برهم کنش دوتایی را وارد نموده و نتایج محاسبات حاصل از آن را مشاهده نماید. این قابلیت مهم، علاوه بر اینکه امکان انجام محاسبات توابع در شرایط مختلف هم دما و هم فشار ترمودینامیکی را ایجاد می نماید، به کاربر نیز این امکان را می دهد که مقایسات نتایج حاصل از مقدار اپتیمم و مقادیر متفاوت و دلخواه دیگر را مشاهده و بررسی نماید.

گرافیک نرم افزار و اجرای آن، در حالت هم فشار ۱۰۰۶۵۰ مگا پاسکال و با استفاده از معادله حالت ون در والس و بهینه سازی مقادیر آنتالپی تجربی فاز بخار مرتبط با سیستم تعادلی سیکلوهگزان-نرمال پنتان [8] در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که قبلا گفته شد پارامترها و مقادیر مورد نیاز در انجام محاسبات در بانک اطلاعاتی نرم افزار گنجانده شده اند و مقادیر تجربی می بایست به یکی از فرم های جدول ۲، توسط کاربر وارد شوند. در حالت نشان داده شده در شکل ۱، این بهینه سازی با استفاده از ۴ دسته داده به شکل P, H^v, y, T انجام شده است. از آنجا که حالت تعادلی ترمودینامیکی مورد بحث هم فشار می باشد، فشار به عنوان پارامتر ثابت انتخاب شده و داده ها به شکل (دما، جزء مولی استون در فاز بخار، آنتالپی فاز بخار) وارد شده است.

The screenshot shows a software interface with the following components:

- Fixed parameter:** P
- Property:** Hv
- Compound 1:** CYCLOHEXANE
- Compound 2:** N-PENTANE
- Equation Type:** Van der Waals
- Input Table:**

Hv	Y1	T	Hv optimum	Hv Kij
998.1714	0.0687	370.332	1017.6814	1057.0874
730.4223	0.1356	369.292	739.9535	783.4033
516.3137	0.1936	368.295	504.9961	551.4608
323.0218	0.243	367.423	310.0742	358.7366
- Dialog Box:** 0.398692001495874
- Buttons:** Calculate Optimum, Calculate, Help

شکل ۱. اجرای نرم افزار و بهینه سازی محاسبه آنتروپی سیستم هم فشار سیکلوهگزان-نرمال پنتان

نمایش اپتیمم مقدار پارامتر بر هم کنش دوتایی، و نیز مقادیر اپتیمم آنتالپی محاسبه شده در نرم افزار، همچنین نتایج محاسبه مقادیر آنتالپی در حالتی که پارامتر برهم کنش دوتایی برابر با مقدار صفر توسط کاربر وارد گردید، نیز قابل مشاهده می باشد. مقایسات مقادیر تجربی آنتالپی با مقادیر بهینه سازی شده (H^v Optimum) و مقادیر محاسبه شده در نتیجه انتخاب مقدار صفر برای پارامتر برهم کنش دوتایی توسط کاربر ($H^v k_{ij}$) نیز قابل مشاهده اند. این مقادیر در شکل ۲ مشخص شده اند. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می گردد بهینه سازی محاسبات توسط اعمال اپتیمم پارامتر بر هم کنش دوتایی، نزدیکی بسیار زیادی به مقادیر تجربی حاصل می نماید.

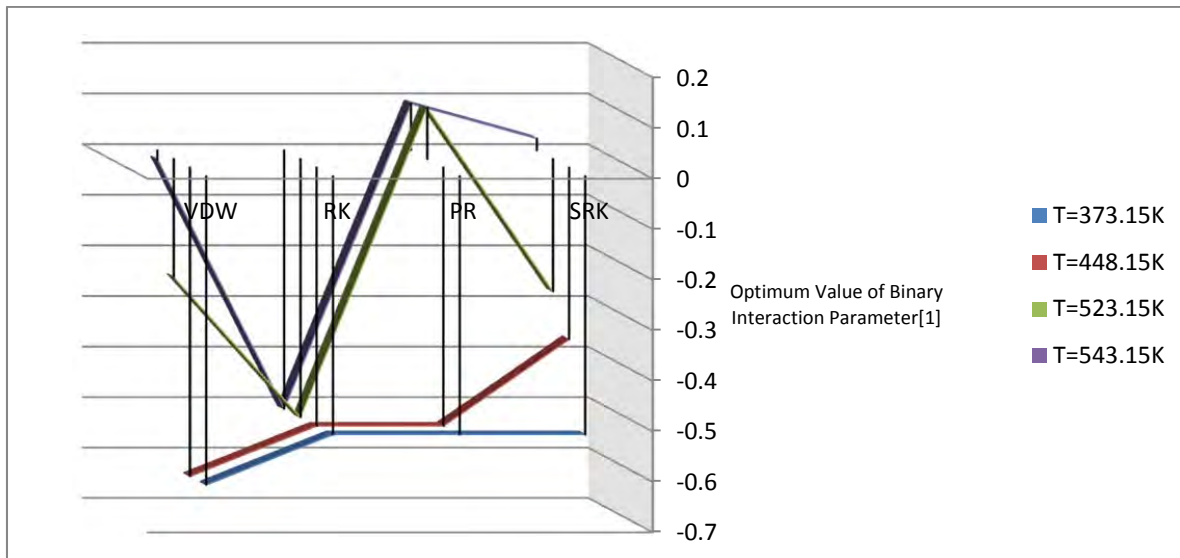
Hv	Y1	T	Hv optimum	Hv Kij
998.1714	0.0687	370.332	1017.6814	1057.0874
730.4223	0.1356	369.292	739.9535	783.4033
516.3137	0.1936	368.295	504.9961	551.4608
323.0218	0.243	367.423	310.0742	358.7366

شکل ۲: مقایسات نتایج محاسبات

لازم به ذکر است در این نرم افزار آیکون Help وجود دارد که به کاربر امکان می دهد تعاریف مرتبط با نشانه ها، حروف، علائم و پارامترهای موجود و واحد دیمانسیون آنها را در نرم افزار مشاهده نماید. واحد SI به عنوان واحد پیش فرض در این نرم افزار، لحاظ شده است که البته توسط کاربر قابل تغییر می باشد.

4- نتایج بهینه سازی

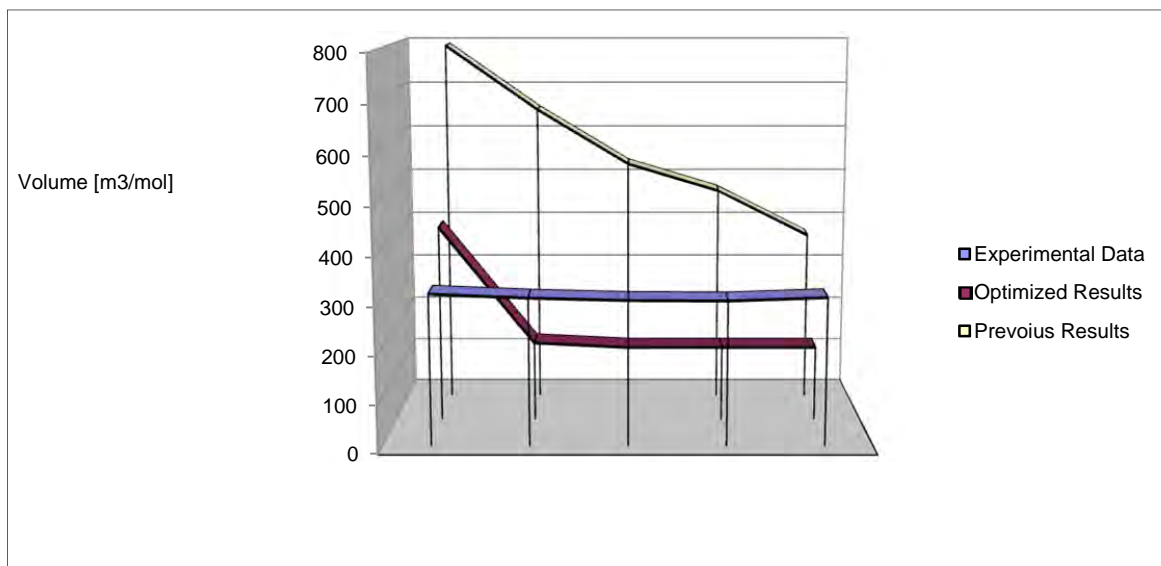
چند نمونه از نتایج عملیات بهینه سازی حاصل از اجرای این نرم افزار در حالت های ترمودینامیکی متفاوت و همچنین به کارگیری مقادیر متفاوت پارامتر برهم کنش دوتایی مرتبط با سیستم های مختلف تعادلی در ادامه می آیند. به عنوان مثال در شکل ۳ مقادیر اپتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی مربوط به سیستم تعادلی استون-بنزن در چهار شرایط همدم با استفاده از داده های حجمی تجربی فاز بخار [9] و به کارگیری چهار معادله حالت مکعبی مورد بحث، توصیف شده است.



شکل ۳. مقادیر متغیر اپتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی محاسبه شده سیستم استون-بنزن در چهار هم دما و چهار معادله حالت

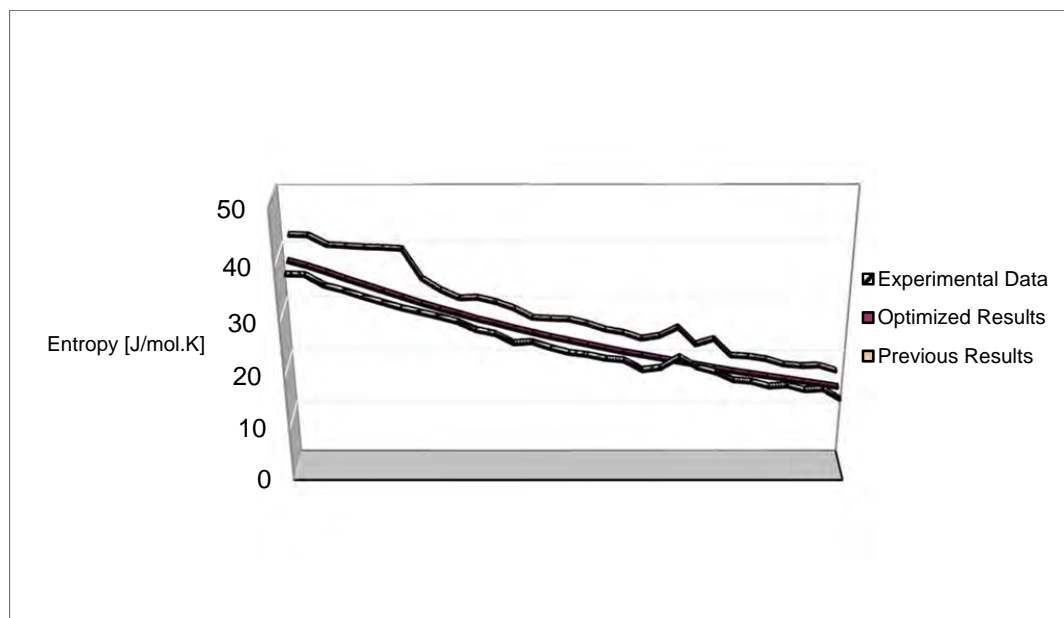
همان طور که مشاهده می شود این مقادیر ثابت نبوده و جهت بهینه سازی محاسبات می بایست این مقادیر اپتیمم متفاوت ، لحاظ گردد.

همچنین نتایج بهینه سازی مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. این شکل، مقادیر حجمی حاصل از مقدار اپتیمم پارامتر بر هم کنش دوتایی را در مقایسه با مقادیر حجمی تجربی و نیز مقادیر حجمی حاصل از محاسبات مذکور با اعمال مقدار پارامتر بر هم کنش دوتایی گزارش شده در مراجع [10] نشان می دهد.



شکل ۴. نتایج بهینه سازی محاسبات حجمی فاز بخار سیستم بنزن-استون

همچنین مقایسات محاسبات آنروپی در سیستم اتان- بوتان با استفاده از داده های تجربی فاز مایع [11] در همدمای ۳۲۳,۱۵ کلوین نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است:



شکل ۵. نتایج بهینه سازی محاسبات آنروپی فاز مایع سیستم اتان-بوتان در همدمای ۳۲۳,۱۵ کلوین

همان طور که قبلا گفته شد انحراف محاسبات ترمودینامیکی با استفاده از مقدار اپتیمم پارامتر بر هم کنش دوتایی به حداقل کاهش می یابد.

5- نتیجه گیری

محاسبات ترمودینامیکی مخازن هیدروکربوری و دقت مورد نیاز این محاسبات از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد. به همین منظور نرم افزاری را با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک طراحی نموده ایم که محاسبات توابع ترمودینامیکی را در شرایط مختلف ترمودینامیکی هم دما و هم فشار محاسبه نموده و مهم تر از آن بهینه سازی محاسبات را با استفاده از به کار گیری الگوریتم ژنتیک و محاسبه اپتیمم پارامتر برهم کنش دوتایی حاصل می نماید. این نرم افزار می تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در محاسبات ترمودینامیکی مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گیرد.

معرفی علائم و متغیرها

P	فشار (Pa)
R	ثابت جهانی گازها ($8.314471 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
V	حجم مولی ($\text{m}^3\text{mol}^{-1}$)
T	دما (K)
a	پارامتر جذب ($\text{Jm}^3\text{mol}^{-2}$)
b	پارامتر دفع ($\text{m}^3\text{mol}^{-1}$)
Z	ضریب تراکم پذیری (۱)
x,y	جزء مولی در فاز مایع، جزء مولی در فاز بخار (1)
k_{ij}	پارامتر برهم کنش دوتایی (۱)
a	پارامتر وابسته به دمای بحرانی و ضریب بی مرکزی در معادلات حالت (1)
ω	ضریب بی مرکزی (۱)
c	زیرنویس مربوط به خواص بحرانی
r	زیرنویس مربوط به خواص کاهیده
i,j,k	زیرنویس مربوط به خواص جزء
ij	زیرنویس مربوط به خواص اختلاط
l	بالانویس مربوط به فاز مایع
v	بالانویس مربوط به فاز بخار
H	آنتالپی (Jmol^{-1})
S	آنتروپی ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
U	انرژی داخلی (Jmol^{-1})
C_P^{ig}	ظرفیت حرارتی در فشار ثابت گاز ایده آل ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T_0	دمای مبنا (298.15 K)
P_0	فشار مبنا (101325 pa)
H_0^{ig}	آنتالپی گاز ایده آل در حالت مرجع (0 Jmol^{-1})
S_0^{ig}	آنتروپی گاز ایده آل در حالت مرجع ($0 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T_{am}	متوسط حسابی دما (K)
T_{lm}	متوسط هندسی دما (K)
L_1	ضریب دما به توان صفر در فرمول محاسبه ظرفیت حرارتی (1)
L_2	ضریب دما به توان یک در فرمول محاسبه ظرفیت حرارتی (K^{-1})
L_3	ضریب دما به توان دو در فرمول محاسبه ظرفیت حرارتی (K^{-2})
L_4	ضریب دما به توان منفی دو در فرمول محاسبه ظرفیت حرارتی (K^2)

مراجع

- [1] L.Meng, YY.Duan, .Li, Fluid Phase Equilib.2004, pp109-120
- [2]Orbey, H., and S. I. Sandler, Modeling Vapor-Liquid Equilibria: Cubic Equations of State and Their Mixing Rules, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. (1998)
- [3]C.Berro and A.Peneloux.J.Chem.Eng.Data, 1984, 29,206.
- [4]J.M.Smith, H.C.Van Ness, M.M.Abbot Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, McGraw Hill, 2005.
- [5] Wong, D. S. H., and S. I. Sandler, "A Theoretically Correct Mixing Rule for Cubic Equations of State," AIChE J, 1992, pp 671-680.
- [6]Gallant RB.Jay Raily, Physical Properties of Hydrocarbons, Second Edition. Golf publishing company, 1997, pp209-245.
-]J.M.Smith, H.C.Van Ness, M.M.Abbot Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, McGraw Hill, 2005.,pp401-437[437.
- [8]Gallant RB.Jay Raily,Physical Properties of Hydrocarbons,Second Edition.Golf publishing company,209-245,1997.
- [9] Y. Zhu and Z. Xu, Fluid Phase Equilib. 1999, pp 19-29.
- [10]M.D.Vose.The Simple Genetic Algorithm Foundations and Theory.The MIT Press,Cambridge,MA,1999.
- [11]Ahmed.Tarek., Reservoir Engineering Handbook, second edition-chapter 1-2-15 (2001).